

eTopoi

Journal for Ancient Studies

Volume 1 (2011), pp. 45–68

Gerd Graßhoff – Christian Berndt

Die Entasis der Säulen des Pantheon

Communicated by Jürgen Renn

Edited by Gerd Graßhoff and Michael Meyer,
Excellence Cluster Topoi, Berlin

eTopoi ISSN 2192-2608

<http://journal.topoi.org>



Except where otherwise noted,
content is licensed under a Creative Commons
Attribution 3.0 License:

<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0>

Gerd Graßhoff – Christian Berndt

Die Entasis der Säulen des Pantheon

Communicated by Jürgen Renn

Der Durchmesser klassischer Säulen nimmt mit zunehmender Höhe ab. Vitruv nennt diese Abnahme *Entasis* und zieht ästhetische Gründe für ihre Nutzung schon in der griechischen Architektur heran. Nichtsdestotrotz blieb die genaue geometrische Form der Entasis unerklärt. Auch in späteren Zeiten war sie Gegenstand weitläufiger Spekulationen. Die monumentalen Säulen der Portikus des Pantheon in Rom wurden mit einer Entasis hergestellt. Der Artikel beschreibt die genauen Vermessungen ihrer Proportionen und eine Methode zur Bestimmung der Geometrie der Entasis. Als Datengrundlage wurde das Bern Digital Pantheon Model benutzt.

Pantheon; Entasis; Architektur; Wissenschaftsgeschichte; Geometrie; Mathematik.

The diameter of classical columns slightly decreases with height. Vitruvius calls it *entasis* and cites aesthetic reasons for its use already in Greek architecture. However, the exact geometrical shape of the entasis remained unexplained. It was subject to wide speculation even in later times. The large columns at the Porticus of the Pantheon in Rome are made with an entasis. This article describes the exact measurements of their proportion and a method to determine the geometry of the entasis. The Bern Digital Pantheon Model is used as the data source.

Pantheon; entasis; architecture; history of science; geometry; mathematics.

1 Einleitung

Die Schäfte der Portikussäulen des Pantheon sind 40 Fuß hohe Monolithe aus Granit, die aus zwei unterschiedlichen Steinbrüchen in Ägypten stammen. Der hellgraue Stein der Säulen der vorderen Reihe stammt aus dem kaiserlichen Steinbruch am Mons Claudianus.¹ Die rötlichen Schäfte der hinter der Frontseite stehenden Säulen stammen wahrscheinlich aus der Assuanregion.² Die 16 jeweils rund 50 Tonnen schweren Kolosse mussten auf dem Seeweg aus Ägypten nach Rom gebracht werden. Ihren Abmessungen und ihrer Masse nach liegen sie zwar nicht am äußersten Limit dessen, was in der römischen Architektur möglich war. Ihr Transport und ihre Aufstellung dürften aber auch für römische Architekten und Ingenieure eine nicht zu unterschätzende bautechnische und logistische Herausforderung dargestellt haben. Nichtsdestotrotz gibt es Hinweise darauf, dass für die Portikus des Pantheon ursprünglich sogar noch größere Säulen geplant waren.³

Trotz ihrer eminenten architekturhistorischen Bedeutung ist es bislang jedoch nicht gelungen, eine befriedigende Antwort auf die Frage zu finden, welches Konstruktionsprinzip den Säulen zu Grunde liegt. Besondere Aufmerksamkeit hat mit Blick auf die

Die Autoren möchten sich herzlich bei Markus Wäfler, Michael Heinzelmann und Jon Albers vom Berner Team des *Bern Digital Pantheon Project* bedanken. Ganz besonderer Dank aber gilt Elisabeth Rinner, die bei zahllosen Gelegenheiten wertvolle Hinweise und Anregungen gab.

Sofern nicht anders angegeben, stammen die Abbildungen dieses Beitrags von den Autoren.

For the following image all rights are reserved, in contrast to eTopois Creative Commons licence usage:
Abb. 14.

1 Scaife 1953.

2 Fine Licht 1968, 40.

3 Wilson Jones 2000, 204–211; Wilson Jones 2009.

Gestaltung der Säulen seit jeher die Frage nach der sogenannten Entasis auf sich gezogen, der harmonischen Wölbung des Säulenschaftes. Systematisch wurde das Problem der Entasis für die römische Architektur erstmals von Gorham P. Stevens untersucht.⁴ Hierzu hat er exemplarische Säulen prominenter römischer Bauten detailliert vermessen und geometrisch analysiert. Die Konstruktion römischer Säulen konnte seinem Befund nach einen beträchtlichen Grad von Komplexität erreichen. Für die Portikussäulen des Pantheon beispielsweise kommt er zum Ergebnis, dass ihr Profil aus zwei einander tangentialen Hyperbelabschnitten konstruiert wurde. In jüngerer Vergangenheit wurde die Frage nach Entwurf und Umsetzung der Entasis zuletzt von Mark Wilson Jones aufgegriffen.⁵ Auf Grund entwurfs- und fertigungspraktischer Überlegungen beurteilt er Stevens' Rekonstruktionsversuche skeptisch. Doch bleiben auch seine Gegenvorschläge an zahlreichen Stellen spekulativ, weil er viele der von Stevens untersuchten Beispiele nicht neu vermessen konnte.

Das Ziel vorliegender Studie ist es, auf Basis der Daten des *Bern Digital Pantheon Project*⁶ die Geometrie der Portikussäulen des Pantheon zu analysieren und eine Hypothese zur geometrischen Konstruktion der Entasis zu entwickeln. Anhaltspunkte für die Entwicklung eines Konstruktionsmodells, das den empirischen Profilverlauf erklären kann, liefern zum einen die bei Vitruv überlieferten Angaben zum Entwurf von Säulenarchitekturen und zum anderen im Apollontempel von Didyma entdeckte antike Entwurfszeichnungen.

Zugleich verfolgt diese Untersuchung das Ziel, die besonderen Herausforderungen der Rekonstruktion von Wissensbeständen zu untersuchen, die an der Schnittstelle zwischen explizitem geometrisch-räumlichen Wissen und praktischem Wissen, das zur fachmännischen Umsetzung theoretischer Modelle erforderlich ist, angesiedelt sind. Die Frage nach der Art des Wissens, das zur Herstellung der Säulen des Pantheon benötigt wird, ist nicht mit der häufig gebrauchten Alternative zwischen deskriptivem oder praktischem Wissen zu beantworten. Vielmehr zeigt sich nirgendwo so deutlich wie in der Epistemologie der Architektur, dass Wissen um den Raum hybride Formen von Wissen erfordert. Deren Rekonstruktion benötigt somit ein methodologisches Rüstzeug, das in der Lage ist, die hybride Wissensverwendung zu bestimmen, und die Rechtfertigungsmittel bereitstellt, die eine solche Rekonstruktion erfordert.

Schließlich zielt diese Studie darauf ab, anhand eines konkreten Fallbeispiels exemplarisch zu demonstrieren, wie digitale Erkenntnismittel für die Beantwortung archäologischer und architekturhistorischer Fragestellungen fruchtbar gemacht werden können. Die Rekonstruktion hybrider Wissensbestände erfordert angepasste Darstellungs- und Rechtfertigungsstrategien (siehe oben). Hierzu gehören die Bereitstellung der Daten und der benutzten Algorithmen, um jedem die Möglichkeit zu geben, die numerischen Analysen nachzuvollziehen und zu variieren. Deshalb werden alle rechtfertigungsrelevanten Materialien unter *Open Access* über das Internetangebot⁷ des Projekts öffentlich zugänglich gemacht.

2 Datenbasis

Die Grundlage für die Analyse der Geometrie der Portikussäulen bilden Koordinatenextrakte aus dem digitalen Berner Pantheon Modell. Es handelt sich hierbei um ein dreidimensionales Koordinatenmodell der inneren und äußeren Gebäudeoberfläche des Pantheon in Rom, das aus zahlreichen Teilsfans des Bauwerks zusammengesetzt wurde. Die

4 Stevens 1924.

5 Wilson Jones 1999.

6 Viz. Graßhoff, Heinzelmann und Wäfler 2009.

7 www.digitalpantheon.ch.

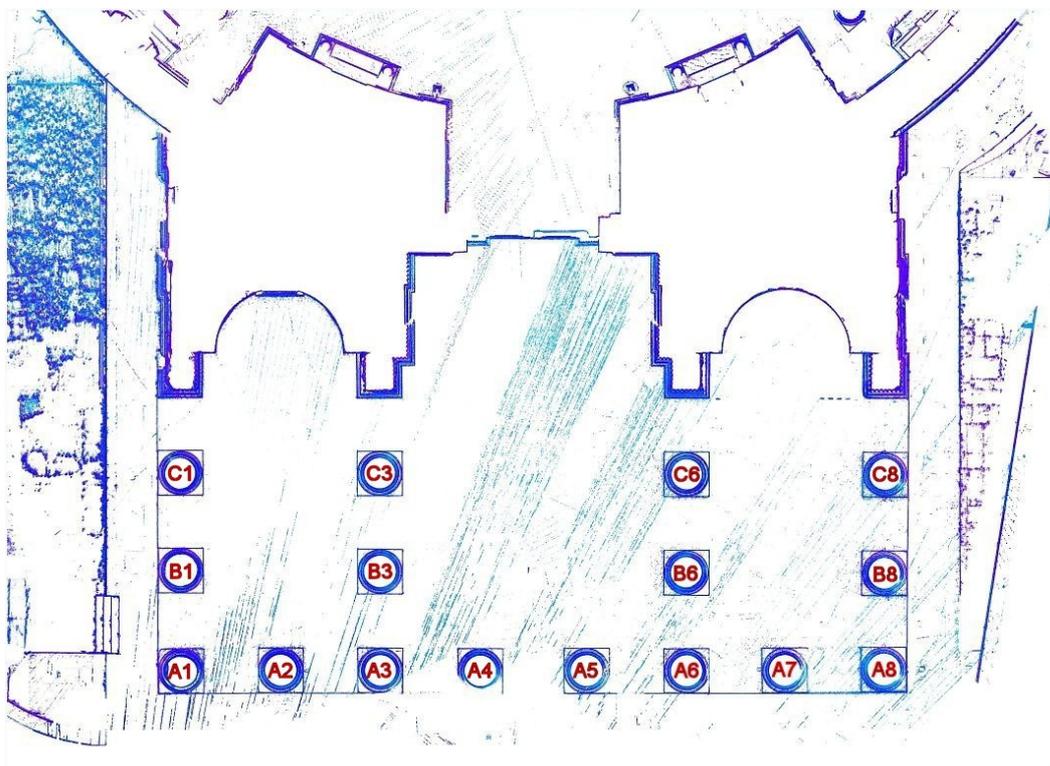


Abb. 1 | Schnitt in 2 m Höhe durch das 3D-Modell der Portikus. Bezeichnung der Säulen in drei Reihen (A, B, C) mit der Zählung von links nach rechts vor dem Gebäude stehend. BDPP0750.

Einzelscans wurden im Rahmen zweier mehrwöchiger Kampagnen in den Jahren 2005 und 2007 durchgeführt. Für die Aufnahmen wurde ein Laserscanner vom Typ Leica HDS 3000 benutzt.⁸

In einem zweiten Schritt wurden die Punktwolken der insgesamt 43 Scans zu einem Gesamtmodell des Gebäudes mit einem einheitlichen Koordinatensystem zusammengefügt. Nach Abschluss der Synthese wurde die Punktwolke ‚eingefroren‘, so dass sie als Referenzmodell für alle weiteren Untersuchungen dienen kann. Die Synthese der Einzelaufnahmen zu einem Gesamtmodell zielt dabei weniger darauf ab, suggestive Visualisierungen des Gebäudes oder virtuelle Kamerafahrten durch das Modell zu inszenieren. Entscheidend ist vielmehr, dass sich auf Grundlage einer eindeutig definierten Datenbasis und eines einheitlichen Koordinatensystems auch Teilergebnisse der Modellauswertung einfach und zuverlässig aufeinander beziehen lassen.

Für die Analyse der Konstruktion der Portikussäulen wurden die Messpunkte jeder Säule aus dem Referenzmodell extrahiert. Die 16 Datensätze umfassen jeweils ein bis zwei Millionen Koordinatenpunkte. Die Dateien haben eine Größe von 29–64 MB und liegen im universell lesbaren ASCII-Format vor, so dass sie mit beliebigen Anwendungen visualisiert und analysiert werden können. Abb. 2 zeigt zum Beispiel eine Visualisierung aller Koordinatenextrakte in einem mit der Software *Mathematica* erstellten interaktiven Arbeitsblatt, einem Software-Paket zur Datenvisualisierung und numerischen Datenanalyse.

Alle Datensätze sind frei über das Internet zugänglich.⁹ Die hier präsentierten Ergebnisse lassen sich anhand der bereitgestellten Daten mithin uneingeschränkt auf ihre empirischen Voraussetzungen hin überprüfen. Das Pantheonprojekt verfolgt hinsichtlich

8 Zur Projektgeschichte, Datenerhebung und Modellerstellung vgl. Albers u. a. 2009.

9 Unter den Adressen www.digitalpantheon.ch/BDPP0716 – www.digitalpantheon.ch/BDPP0731.

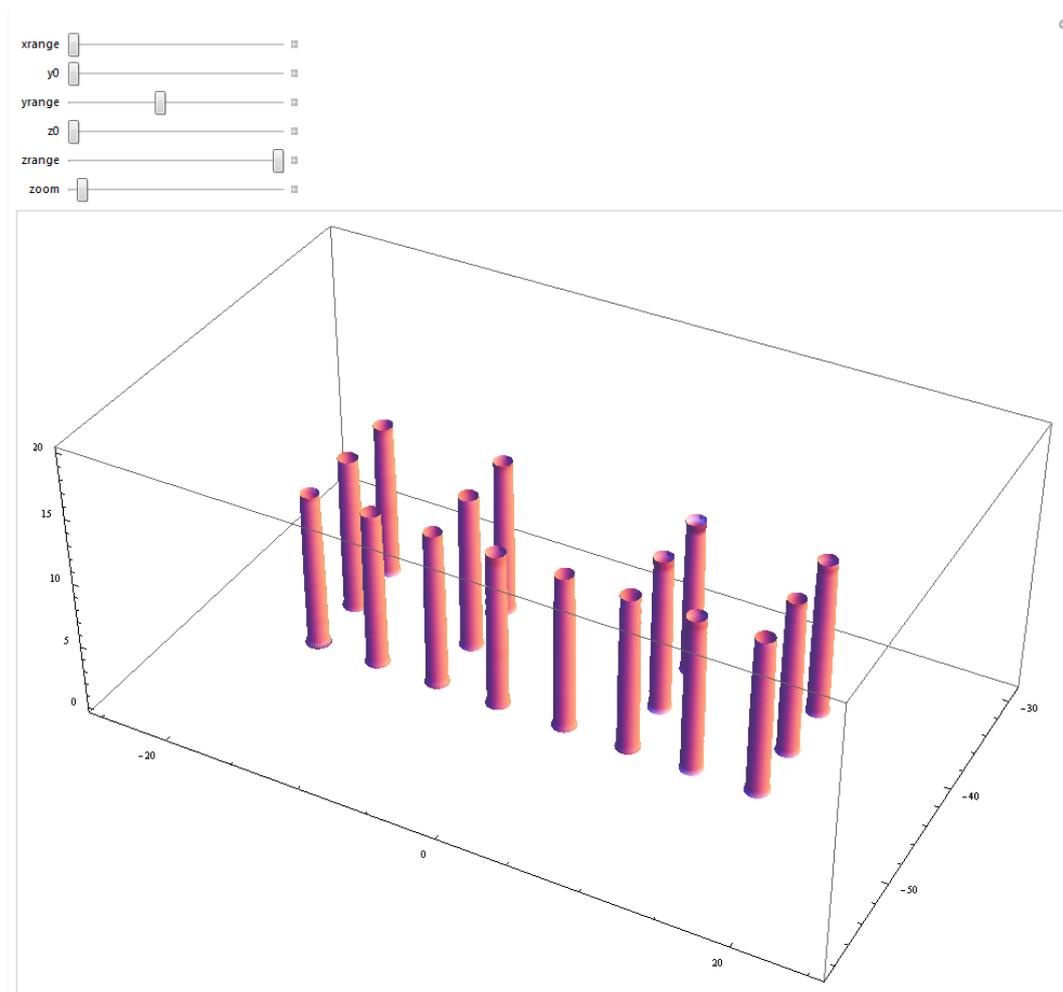


Abb. 2 | Mathematica Notebook zur räumlichen Visualisierung der Koordinatenextrakte der Portikussäulen. BDPP0749.

seiner Forschungsdaten eine konsequente *Open-Access*-Politik. Es sind nicht nur alle Projektpublikationen frei und uneingeschränkt über das Internet zugänglich, sondern es können auch alle rechtfertigungsrelevanten digitalen Forschungsmaterialien über das Internetangebot des Projekts¹⁰ benutzt und heruntergeladen werden.

3 Vitruvs Ausführungen zur Säulenproportion

Auch wenn der Quellenwert von Vitruvs Entwurfslehre für archäologische und bauhistorische Fragestellungen immer wieder skeptisch beurteilt wurde,¹¹ so besteht doch im Grundsatz Einigkeit darüber, dass Vitruv in seinem Handbuch zumindest wesentliche Faktoren benennt, die beim Gebäudeentwurf zu beachten sind. Die konkreten von Vitruv überlieferten Werte und Proportionen mögen zum Teil schon bei der Entstehung der zehn Bücher widersprüchlich gewesen sein. Dennoch geben seine Ausführungen einen guten Eindruck davon, mit welchen Entwurfsentscheidungen sich der antike Architekt konfrontiert sah und welche Strategien ihm zu Gebote standen, konkrete Bauaufgaben zu lösen.

¹⁰ www.digitalpantheon.ch.

¹¹ Knell 2008, 114; Wilson Jones 2000, 35ff.

Die Gestaltung von Säulenarchitekturen ist Vitruvs Darstellung zufolge durch zwei Hauptfaktoren bestimmt: einerseits die Weite des Säulenabstands, welche grundlegend ist für die Erscheinung, Stabilität und Benutzbarkeit der unterschiedlichen Tempelarten (*species aedium* III 3.1); andererseits den Baustil oder die jeweilige Säulenordnung, das *doricum*, *ionicum* oder *corinthium genus* (IV praef.2).

Generell gilt für die Proportionierung von Säulen, dass „[i]n dem Maße [...], wie die Säulenzwischenräume wachsen, [...] die Säulenschaftdicken in entsprechenden Verhältnissen verstärkt werden [müssen].“ (III 3.11)¹² Das heißt, je enger der Säulenabstand ist, desto schlanker sind die Säulen zu proportionieren. Unangemessene Schlankheit oder Gedrungenheit sind dabei gleichermaßen zu vermeiden.

Das eine Extrem der Tempelarten bezeichnet der engständige Pyknostylos mit einem Säulenabstand von eineinhalb Schaftdurchmessern und einer Säulenhöhe von zehn Schaftdicken; das andere Extrem stellt der weitständige Araeostylos dar mit Interkolumnien von mehr als drei und einer Säulenhöhe von acht Schaftdurchmessern (III 3.10). Die Mitte zwischen beiden hält der von Vitruv besonders empfohlene Eustylos, der sogenannte Schönsäuler, mit einem Säulenabstand von $2\frac{1}{4}$ und einer Säulenhöhe von $9\frac{1}{2}$ Schaftdurchmessern. Der Abstand der beiden Mittelsäulen auf der Front- und Rückseite soll bei ihm drei Säulendurchmesser betragen (III 3.6; 10).

Unabhängig vom jeweiligen Baustil wird die Gestalt einer Säule außerdem durch ihre absolute Höhe und ihre Stellung im architektonischen Gesamtzusammenhang bestimmt: „[...] Ecksäulen [muss man] um den fünfzigsten Teil ihres Durchmessers dicker machen, weil sie ringsum von der Luft beschnitten werden und dem Beschauer zu schlank erscheinen. Also muß die optische Täuschung durch Berechnung künstlich ausgeglichen werden.“ (III 3.11)

Die Verjüngung des Säulenschaftes unterhalb des Kapitells ist gleichfalls unabhängig von der jeweiligen Säulenordnung. Sie fällt umso geringer aus, je größer die absolute Länge der Säule ist. Bei kleinen Säulen (< 15 Fuß) soll der Durchmesser am Hals der Säule $\frac{5}{6}$ des unteren Schaftdurchmessers betragen. „[...] Säulen aber von 40 bis 50 Fuß [das ist die Größenklasse der Portikussäulen des Pantheon] sind [...] in 8 Teile zu teilen, und sieben von ihnen sollen die Verjüngung ganz oben am Säulenschaft unter dem Kapitell bilden.“ (III 3.12)

Die je nach Säulenlänge unterschiedliche Verjüngung des Schaftes dient Vitruv zufolge genau wie die Ecksäulenverstärkung dazu, optische Täuschungen zu kompensieren:

„Das Auge nämlich sucht Anmut und, wenn wir seinem sinnlichen Begehren nicht durch Proportion und vergrößertem Anteil (der höheren Säulen) an den moduli (den unteren Säulendurchmessern) schmeicheln, so daß die optische Verkleinerung durch einen Zusatz ausgeglichen wird, dann wird dem Beschauer ein geistloser und nicht anmutiger Anblick geboten.“ (III 3.13)

Dabei erfolgt die Verjüngung des Schaftes allerdings nicht geradlinig, sondern in Form einer schwach gekrümmten Kurve. Die entsprechende Passage bei Vitruv lautet: „Wie die Schwellung in der Mitte der Säulen, die von den Griechen Entasis genannt wird, weich und passend durchgeführt wird, davon wird am Schluß des Buches Form und Methode beschrieben werden.“ (III 3.13) Ähnlich wie die übrigen von Vitruv beschriebenen architektonischen Verfeinerungen, so lässt sich aus dem Kontext schließen, dient auch die Entasis dazu, dem Bauwerk einen schönen und ebenmäßigen Anblick zu verleihen. Doch weder die erwähnte Darstellung [*forma*] noch die genannte Beschreibung der Konstruktions- oder Berechnungsmethode [*ratio*] haben sich erhalten.

12 Alle Zitate nach der Ausgabe Fensterbusch 1981. Daneben wurde auch die englische Ausgabe Rowland und Noble Howe 1999 benutzt sowie die französische Ausgabe in Gros 1990 und Gros 1992.

Vitruvs Vorschriften zur Länge, Verjüngung und Verstärkung der Säule beziehen sich vor allem auf die Form des Schaftes [*scapus*]. Doch während sich die Werte für die Verjüngung und Verstärkung unmittelbar auf den Schaft beziehen lassen, ist dies im Falle der Schaftlänge nicht möglich. Zwar teilt Vitruv im fünften Buch mit, dass Schäfte ionischer Säulen ein Längen-Breiten-Verhältnis von $8\frac{1}{2}:1$ aufweisen sollen (V 9.4). Allerdings gilt dieser Wert ausdrücklich nur für Säulengänge von Profanbauten. Die Schäfte von Tempelsäulen sollen weniger schlank sein, ohne dass Vitruv hierfür jedoch konkrete Werte angeben würde. Die Länge des Schaftes von Tempelsäulen wird vielmehr als eine abhängige Größe behandelt. Legt man die Angaben zu den Proportionen ionischer Säulen im dritten und vierten Buch zu Grunde,¹³ lässt sich für die Länge des Säulenschaftes ein Wert von etwas mehr als acht ($8\frac{1}{6}$) Schaftdurchmessern erschließen. Dieser Wert gilt sowohl für Säulen des ionischen als auch für solche des korinthischen Stils.

4 Allgemeine Eigenschaften

Um die Geometrie der Portikussäulen zu analysieren, wurden die Koordinatenextrakte vertikal zur Säulenachse in schmale Scheiben geschnitten und für jeden Schnitt mit einem Best-Fit-Algorithmus der Radius und Mittelpunkt bestimmt. Erstmals werden mit dieser Vorgehensweise Fragen der antiken Säulenkonstruktion und -herstellung auf eine breite empirische Basis gestellt. Während bislang einzelne repräsentative Säulenexemplare unterschiedlicher Bauten punktuell vermessen wurden,¹⁴ wird mit der hier beschriebenen Methodik nicht nur der *gesamte* Säulenbestand eines in sich geschlossenen Gebäudeabschnitts in den Blick genommen, sondern die Analyse der Säulenkonstruktion wird erstmals tatsächlich auch auf die *runde* Säule bezogen.

Die berechneten Schaftprofile lassen sich wie in Abbildung 3 dargestellt plotten. Um die Profile unterschiedlicher Säulen miteinander zu vergleichen, wurden die einzelnen Plots zu einem interaktiven Arbeitsblatt zusammengefasst, in dem sich die Schaftprofile überlagern und einfach zueinander in Beziehung gesetzt werden können.¹⁵ Abbildung 3 zeigt die Profile der Säulen A4 und A5, der beiden mittleren Säulen in der vorderen Reihe. Der eigentliche Säulenschaft beginnt in etwa auf einer Höhe von 1 m des Koordinatensystems. Die Profile zeigen eine schwache Krümmung zwischen unterem und oberem Ende. Die beiden steil ansteigenden Abschnitte links und rechts sind die Apophyge, der untere Ablauf des Säulenschaftes am Übergang zur Basis (links) und der Übergang vom Säulenhals zum Kapitell (im Plotbereich nicht mehr dargestellt). Während das obere, etwas dickere Profil (A5) eine durchgehend harmonische Krümmung aufweist, sind am unteren Profil (A4) ab einer Höhe von 5 m (4 m des Säulenschaftes) deutliche Störungen des Kurvenverlaufs zu erkennen. Es handelt sich hierbei um Beschädigungen, die von der Befestigung von Gittern herrühren, die im 18. Jahrhundert zwischen den Säulen angebracht worden waren.¹⁶

13 Höhe der Basis: III 5.1; Höhe des Kapitells: III 5.5, IV 1.1; Gesamtlänge: IV 1.8.

14 Beispielsweise bei Stevens 1924; Wilson Jones 1999.

15 Online verfügbar unter der Adresse www.digitalpantheon.ch/BDPP0748. Für die Analyse der Koordinatenextrakte wurde das Programm Mathematica benutzt, ein Softwarepaket, mit dem sich numerische Analysen durchführen und digitale Modelle erstellen und visualisieren lassen.

Aus Gründen der Performanz sind bei den online veröffentlichten Modellen die Daten bereits in die sogenannten Notebook-Player-Dokumente eingebettet. Ein Zugriff auf das Referenzmodell oder die Koordinatenextrakte ist nicht erforderlich.

Auf der x-Achse ist die Höhe der Säule über dem Nullpunkt des Koordinatensystems des Referenzmodells angegeben. Die Nullebene fällt in etwa mit dem Fußbodenniveau der Portikus zusammen, ist aber ansonsten durch die Definition des Koordinatensystems willkürlich festgelegt. Auf der y-Achse ist der berechnete Säulenradius für die jeweilige Höhe abgetragen. Mit den oberen Bedienelementen lassen sich die einzelnen Schaftprofile unabhängig voneinander ein- und ausblenden und systematisch miteinander vergleichen.

16 Fine Licht 1968, 242.

Column Forms of the Porticus

C3 True False
 B3 True False
 A2 True False A3 True False A4 True False A5 True False A6 True False A7 True False A8 True False
 C6 True False
 B6 True False
 C8 True False
 B8 True False

Parameter

SpreadOffY 1 2 3 8 16
 scale 900 1500 1800 2400

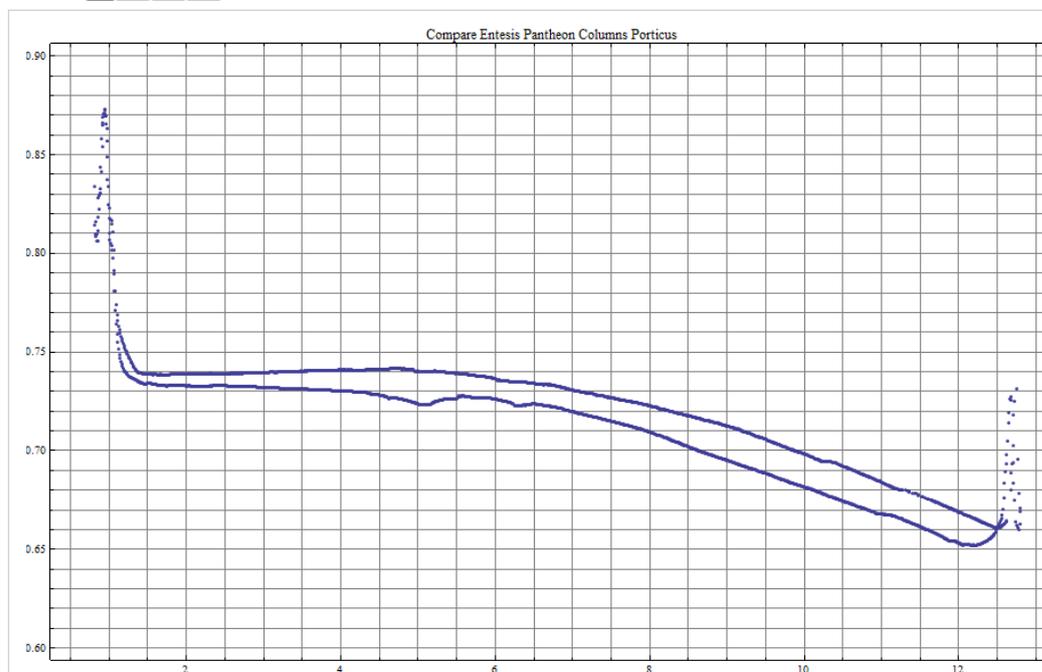


Abb. 3 | Mathematica Notebook zum Vergleich der Säulenradien. BDPP0748.

Legt man alle Schaftprofile übereinander, zeigt sich, dass mit Ausnahme der drei Säulen A1, B1 und C1 alle Säulen ein gleichartiges, schwach gekrümmtes Profil aufweisen (vgl. Abb. 4). Die drei stark beschädigten Säulen A1, B1 und C1 an der Ostseite stammen aus den benachbarten Neronischen Thermen und wurden im 17. Jahrhundert dazu benutzt, die an der Ostflanke stark beschädigte Säulenvorhalle wiederherzustellen.¹⁷ Als nachantike Reparaturen sind sie nicht Gegenstand der weiteren Analyse. Die allermeisten Profile liegen in einem rund 2 cm breiten Toleranzband, das links bei einem unteren Schaftradius von 0,72–0,74 m beginnt und rechts bei einem oberen Schaftradius von 0,63–0,65 m endet.

Die Hauptkonstruktionsparameter für die Schäfte der Portikussäulen sind in der Tabelle 1 zusammengefasst. Der untere Radius bezieht sich auf die geradlinige Verlängerung des unteren Profilschnitts bis zum unteren Schaftende. Die Apophyge wird entsprechend antiker Entwurfspraxis (siehe unten) nicht berücksichtigt. Analog wurde der obere Schaftradius an der Verlängerung des schwach gekrümmten Bogensegments am oberen Schaftende bestimmt. Das bedeutet, das empirische Minimum des Schaftprofils kann, muss aber nicht mit dem konstruktiven oberen Schaftradius zusammenfallen.

Der mittlere untere Schaftradius beträgt 0,733 m; der mittlere obere Schaftradius beträgt 0,642 m. Bei der Berechnung der Mittelwerte wurden die Säulen A8 und B3 nicht berücksichtigt, da sie deutlich dicker ausgeführt sind als die übrigen Säulen. Die Verstärkung der Säule A8 wird durch die bei Vitruv überlieferten Gestaltungsvorschriften vor Ecksäulen (III 3.11) erklärt. Die Gründe für den deutlich überdurchschnittlichen Durchmesser

¹⁷ Fine Licht 1968, 241f.

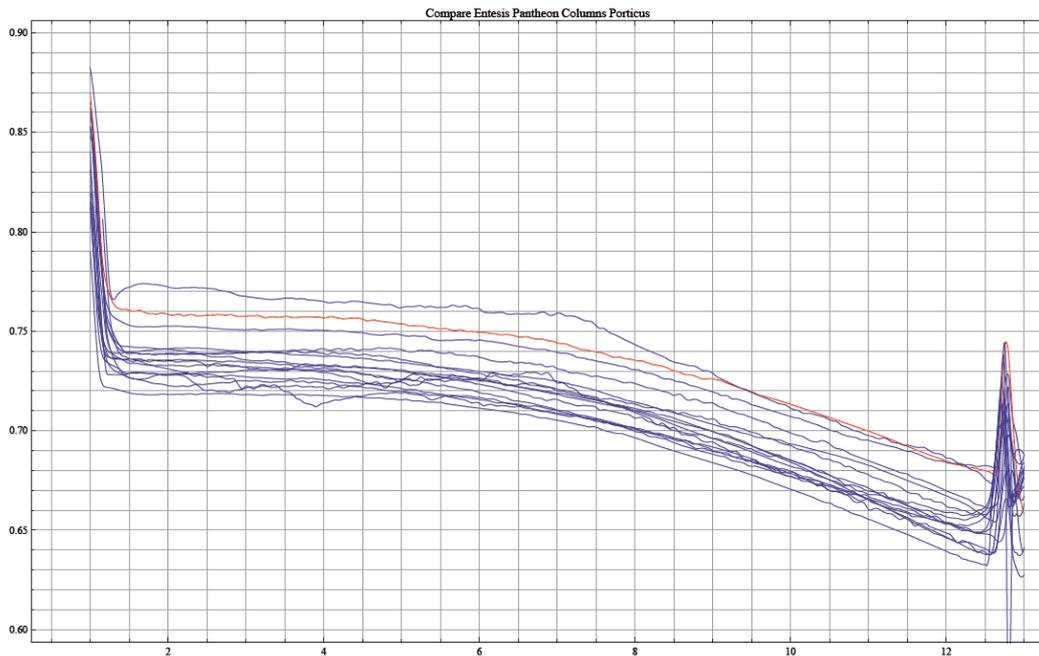


Abb. 4 | Kurvenschar aller Säulenradien als Funktion der Höhe in Meter.

der Säule B3 hingegen sind unklar. Die Übersicht zeigt, dass die Differenz zwischen unterem und oberem Schaftradius nahezu konstant 0,09 m beträgt. Sie stimmt damit gut mit dem bei Vitruv überlieferten Wert für die Verjüngung von Säulen in der Größe der Portikussäulen überein.¹⁸ Die Verstärkung der Ecksäule A8 um gut 3 % gegenüber dem mittleren Schaftradius liegt gleichfalls in der von Vitruv angegebenen Größenordnung (III 3.11).

Geht man nicht nur davon aus, dass die Schäfte entsprechend Vitruvs Symmetrie-Konzept gemäß ganzzahliger Vielfacher beziehungsweise ganzzahliger Bruchteile proportioniert sind, sondern nimmt auch an, dass ihr Durchmesser und ihre Länge gleichfalls ganzzahlige Abmessungen haben, bilden die Schaftdimensionen der Portikussäulen einen guten Ausgangspunkt, um das Fußmaß des Pantheon zu bestimmen. Bei einem Schaftdurchmesser von fünf Fuß und einem mittleren unteren Schaftradius von $0,733 \text{ m} \pm 0,007 \text{ m}$ beträgt das Fußmaß:

$$1 \text{ Fuß} = 0,293 \text{ m} \pm 0,003 \text{ m.}$$

Die Länge der Schäfte von 11,7 m entspricht mithin 40 Fuß.¹⁹ Dieser Fußwert liegt am unteren Ende der für römische Bauten vorgeschlagenen Werte.²⁰ Gegebenenfalls könnte der Wert durch die Analyse anderer relevanter Dimensionen (Kuppeldurchmesser, Kuppelhöhe etc.) noch weiter präzisiert werden.

5 Entasiskonstruktion

Die Bauaufgabe lässt erwarten, dass für die Portikussäulen mit Ausnahme der Ecksäulen ein einheitliches Konstruktionsprinzip benutzt wurde. Dennoch ist die Gleichartigkeit der Säulenprofile und die nur geringe Differenz ihrer Abmessungen (vgl. Abb. 4) bemerkenswert, zumal wenn man die absoluten Dimensionen der Säulen und ihre Herkunft

18 III 3.12: Der obere Schaftdurchmesser soll bei Säulen von 40 bis 50 Fuß $\frac{7}{8}$ (0,875) des unteren Schaftdurchmessers betragen. Der ermittelte Verjüngungsfaktor ($r_o : r_u$) beträgt 0,876.

19 $40 \cdot (0,293 \pm 0,003) \text{ m} = 11,72 \text{ m} \pm 0,12 \text{ m}$.

20 Wilson Jones 2000, 72.

Tab. 1 | Hauptkonstruktionsparameter für die Schäfte der Portikussäulen. r_u : unterer Schaftradius. r_o : oberer Schaftradius. $r_u - r_o$: Differenz zwischen unterem und oberem Schaftradius. Bei der Berechnung der Mittelwerte wurden die Säulen A8 und B3 nicht berücksichtigt, da sie deutlich dicker ausgeführt sind als die übrigen Säulen. Die Verstärkung der Ecksäule A8 wird durch die bei Vitruv überlieferten Gestaltungsvorschriften (III 3.11) erklärt. Die Gründe für den deutlich überdurchschnittlichen Durchmesser der Säule B3 hingegen sind unklar.

Säule	r_u (in m)	r_o (in m)	$r_u - r_o$ (in m)
A2	0,738	0,648	0,090
A3	0,730	0,632	0,098
A4	0,733	0,640	0,093
A5	0,741	0,655	0,086
A6	0,741	0,654	0,087
A7	0,735	0,643	0,092
A8	(0,760)	(0,672)	(0,088)
B3	(0,753)	(0,663)	(0,090)
B6	0,725	0,642	0,083
B8	0,736	0,637	0,099
C3	0,729	0,637	0,088
C6	0,718	0,627	0,091
C8	0,739	0,649	0,090
Mittelwert	0,733	0,642	0,091

aus zwei unterschiedlichen Steinbrüchen bedenkt. Die Passagen zur Entasis bei Vitruv (III 3.13, III 5.14) deuten darauf hin, dass zu seiner Zeit auch eine allgemein bekannte Methode existierte, um ein harmonisch gewölbtes Schaftprofil zu entwerfen. Allerdings haben sich weder die von ihm erwähnte Darstellung [*forma*] noch die Beschreibung der Konstruktionsprinzipien [*ratio*] erhalten. Es überrascht daher kaum, dass seit der Renaissance zahlreiche Vorschläge gemacht wurden, um das von ihm erwähnte Konstruktionsverfahren zu rekonstruieren.²¹ Keiner dieser Vorschläge aber scheint allgemeine Anerkennung gefunden zu haben.

5.1 Die Entasiskonstruktion von Didyma

Gegenüber früheren Versuchen, die Prinzipien des Entasientwurfs zu rekonstruieren, befinden wir uns heute in einer ungleich günstigeren Position, weil sich mit der spektakulären Entdeckung des ‚Planarchivs‘ von Didyma²² unsere Kenntnisse antiker Entwurfsmethoden dramatisch verbessert haben. Unter den im Jahre 1979 von Lothar Haselberger entdeckten Bauzeichnungen an den Sockelwänden des Adytions des Apollonheiligtums von Didyma befinden sich auch mehrere Zeichnungen, die der Konstruktion der kolossalen Säulen des Peristyls gewidmet sind. Mit Blick auf die Frage der Entasiskonstruktion ist vor allem eine Zeichnung am Ostende der Nordwand von Interesse, die in Abbildung 5 dargestellt ist.

Die Zeichnung misst ungefähr $1,2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ und ist wie alle anderen Konstruktionen in Didyma als feine Ritzzeichnung ausgeführt. Die Konstruktion beschreibt das Halbprofil einer Säule. Entgegen dem ersten Eindruck handelt es sich nicht um eine ausschnittshafte Darstellung des unteren Säulenabschnitts, sondern um die geometrische Konstruktion der *gesamten* Säule mit Ausnahme des Kapitells. Der untere Teil – Torus, Rundstab und unterer Ablauf – ist im Maßstab 1 : 1 dargestellt. Der obere, horizontal schraffierte Bereich dagegen zeigt das Profil des Säulenschaftes mit verzerrten Proportionen. Während der Schaft in horizontaler Richtung ebenfalls im Originalmaßstab dargestellt ist, ist das Profil in vertikaler Richtung um den Faktor 16 gestaucht.²³

21 Zu den frühneuzeitlichen Rekonstruktionsbemühungen zuletzt: Becchi 2008.

22 Zuerst publiziert in: Haselberger 1980; Haselberger 1983.

23 Haselberger 1980, 200.

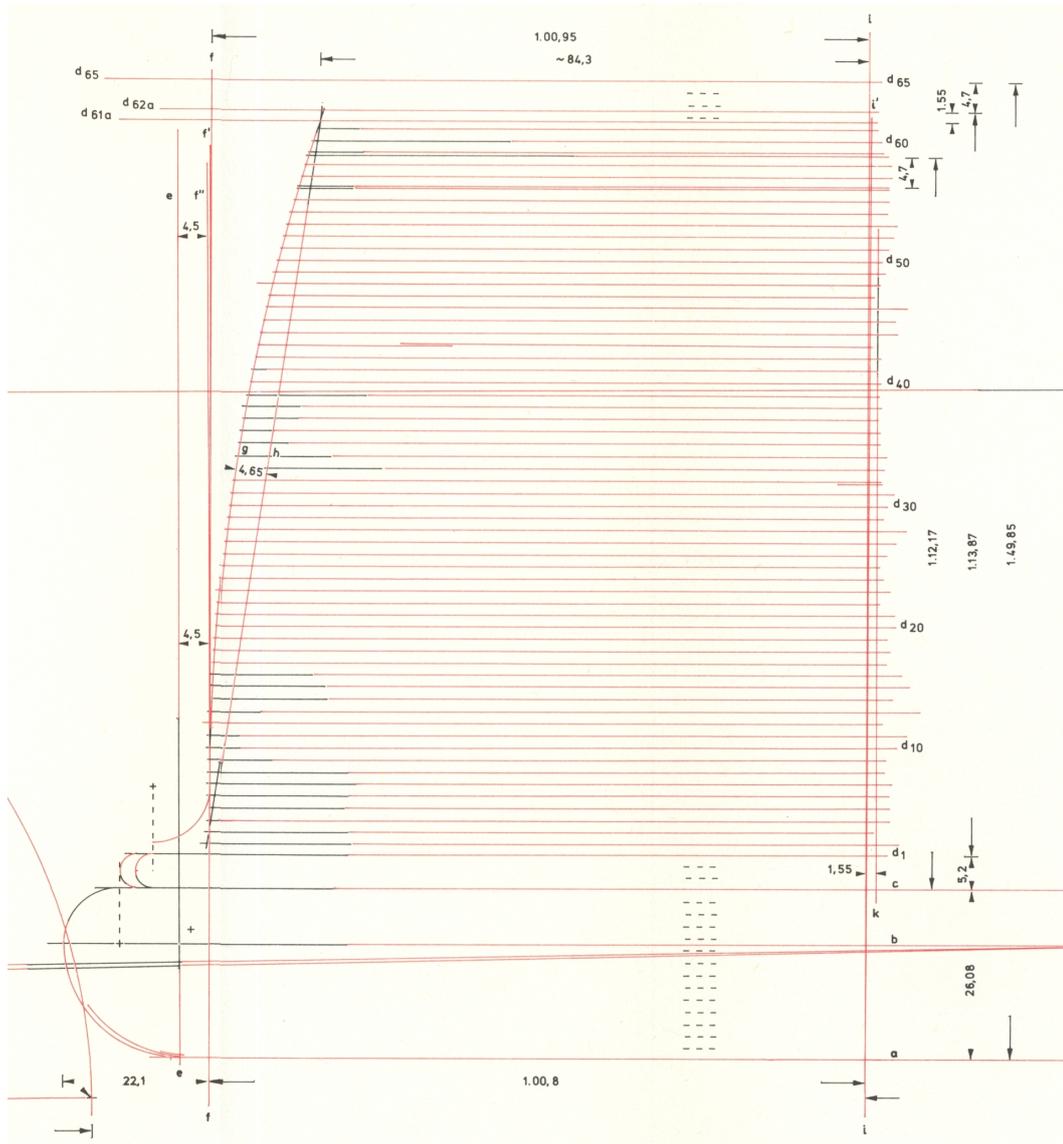


Abb. 5 | Umzeichnung der Säulenkonstruktion von Didyma. Der horizontale Maßstab entspricht der Originalgröße. Der vertikale Maßstab ist im Bereich des Schaftes im Verhältnis 1 : 16 verkürzt. Rot: am Stein sichtbare Ritzlinie. Schwarz: Verlängerung einer vorhandene Ritzlinie. Gestrichelt: Ergänzende Linie. Haselberger 1980, Beilage 1 Abb. 1 (Ausschnitt).

Bei der vertikalen Linie rechts (i) handelt es sich um die Säulenachse. Links wird die Konstruktion durch eine zweite Vertikale (f) begrenzt, die über die gesamte Höhe der Zeichnung reicht und mit dem unteren Schaft-radius zusammenfällt. Das untere Ende des Säulenschaftes bezeichnet die letzte, etwas länger ausgezogene Linie (d₁) der eng beieinander liegenden Horizontallinien. Das obere Ende des Schaftes wird durch eine der Linien markiert, die deutlich über die Horizontalschraffur herausragen. Den unteren und oberen Endpunkt des Profils verbindet eine Gerade (h), über die sich eine schwach gekrümmte Linie (g) wölbt. Haselberger identifiziert sie, durchaus plausibel, als ein Kreisbogensegment,²⁴ das oben durch den äußersten Punkt des Schaftprofils verläuft und unten die vertikale Begrenzungslinie links tangiert. Der Mittelpunkt des Kreisbogensegments konnte nicht identifiziert werden. Offen bleibt auch, auf welche Weise der Mittelpunkt des Kreisbogensegments konstruiert wurde.

24 Haselberger 1980, 199.

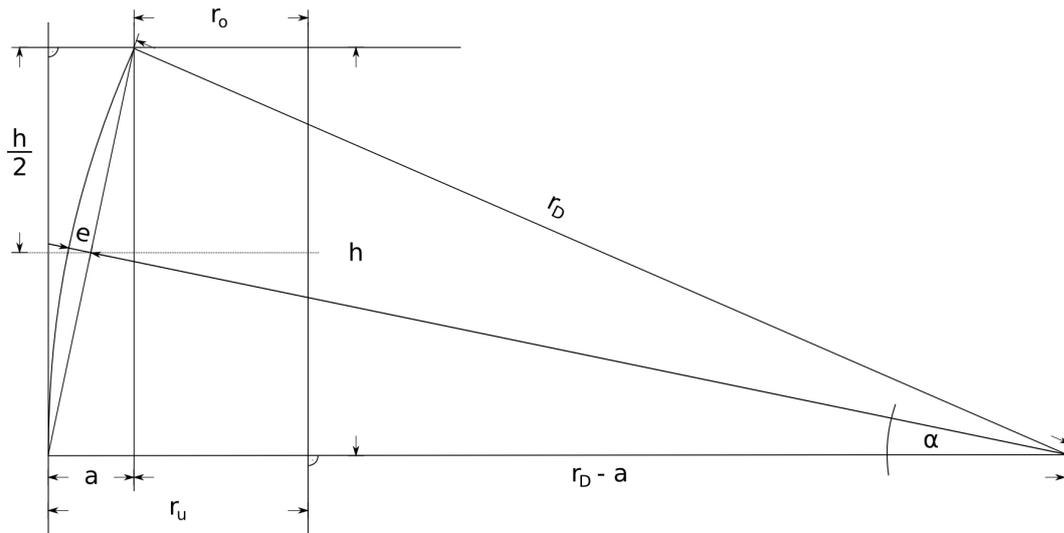


Abb. 6 | Geometrische Beschreibung der Didymakonstruktion.

Das Profil eines Säulenschaftes im Originalmaßstab erhält man, indem das Konstruktionsprofil im Verhältnis 16:1 gestreckt wird. Durch die Streckung des Kreisbogens entsteht ein flaches Ellipsensegment. Die horizontalen Linien auf dem Schaft repräsentieren den Schaftradius als eine Funktion der Säulenhöhe, die der Steinmetz auf den zu bearbeitenden Block übertragen kann. Die Konstruktionszeichnung funktioniert als ein maßstabgerechtes Modell der Säulenform. Die komplizierte Entasisform kann als Ergebnis einer räumlichen Operation mit Zeichenmitteln definiert werden. Dadurch dass die Zeichnung in horizontaler Richtung im Maßstab 1:1 ausgeführt ist, lässt sich der Schaftradius für eine gegebene Höhe direkt an der Zeichnung abgreifen und auf den Säulenschaft übertragen. Die Konstruktion dient also nicht zur Generierung numerischer Daten für die Säulenform und kann mithin nicht als analoges Recheninstrument angesehen werden.

5.2 Geometrische Beschreibung

Geometrisch lässt sich die Entasiskonstruktion von Didyma wie in Abbildung 6 dargestellt beschreiben. r_u und r_o bezeichnen den unteren und oberen Schaftradius. a ist ihre Differenz. r_D bezeichnet den Radius des Konstruktionskreises, dessen Mittelpunkt auf Höhe des unteren Schaftendes liegt. h ist die Höhe des Säulenschaftes in der Zeichnung. In dieser Konstruktion gilt:

$$\begin{aligned} r_D^2 &= (r_D - a)^2 + h^2 \\ &= r_D^2 - 2r_D a + a^2 + h^2. \end{aligned}$$

Somit ist

$$2r_D a = a^2 + h^2,$$

woraus folgt

$$r_D = \frac{a^2 + h^2}{2a}.$$

Das heißt, der Radius des Konstruktionskreises ist ausschließlich über die Höhe des Säulenschaftes in der höhenverkürzten Zeichnung und die Differenz zwischen unterem und oberem Schaftradius bestimmt.

Mit den bei Vitruv überlieferten und für die Portikussäulen des Pantheon ermittelten Konstruktionsparametern, einer Schaftlänge von acht unteren Schaftdurchmessern,

$$h_s = 8 \cdot 2r_u,$$

entspricht die Länge des höhenverkürzten Säulenschaftes bei einem Verkürzungsfaktor von 16 genau dem unteren Schaftradius:

$$h = r_u.$$

Bei einer Verjüngung des Säulenschaftes um ein Achtel des (unteren) Schaftdurchmessers,

$$a = \frac{1}{8}r_u,$$

ergibt sich damit für den Konstruktionskreis ein Radius von

$$r_D = 4\frac{1}{16}r_u.$$

Das bedeutet, der Radius des Konstruktionskreises der Pantheonsäulen müsste bei Verwendung dieser Konstruktion gut viermal so groß sein wie der untere Schaftradius.

5.3 Konstruktionsmodell

Es liegt in der Tat nahe, dass es sich bei dem gekrümmten Profilschnitt in der Didymazeichnung um ein Kreisbogensegment handelt, dessen Mittelpunkt auf der Grundlinie des Schaftes liegt. Doch geht aus der Zeichnung nicht hervor, auf welche Weise dieses Kreissegment konstruiert worden ist. Mindestens zwei Grundvarianten sind denkbar: Einerseits könnte der Mittelpunkt des Kreisbogens auf Basis eines gegebenen Radius' (siehe oben) konstruiert worden sein. Die einfachste Möglichkeit wäre es dann, die Strecke auf der Grundlinie auszumessen. Jedoch ist diese Linie in der Didymakonstruktion offenbar nicht entsprechend weit ausgezogen. Es wäre auch möglich, den Mittelpunkt des Konstruktionskreises zum Beispiel durch zwei Zirkelschläge um den unteren und oberen Endpunkt des Profils zu bestimmen. Noch einfacher wäre ein Verfahren mit einer straff gespannten Schnur, die doppelt so lang ist wie der gegebene Radius. Würden die Enden der Schnur an den beiden Endpunkten des Profils befestigt, müsste man die Schnur nur noch stramm ziehen, um den Mittelpunkt des Konstruktionskreises festzulegen.

Ist der Radius des Konstruktionskreises vorab nicht bekannt, sondern nur der obere und untere Endpunkt des Profils, so lässt sich der Mittelpunkt des Kreissegments auch auf andere Weise bestimmen. Beispielsweise indem man die Mittelsenkrechte auf die Strecke zwischen den beiden Endpunkten des Profils errichtet und ihren Schnittpunkt mit der verlängerten Basislinie des Schaftes bestimmt. Ein solches Vorgehen würde die gerade Verbindungslinie zwischen unterem und oberem Profilenpunkt erklären. Jedoch gibt es in der von Haselberger publizierte Umzeichnung der Konstruktion keine Hinweise darauf, dass auf der schrägen Linie (h) tatsächlich eine Mittelsenkrechte konstruiert worden wäre. Zudem ist die Basislinie seiner Darstellung zufolge zu kurz.

Da sich weder bei Vitruv noch in der Zeichnung von Didyma eindeutige Anhaltspunkte dafür finden lassen, auf welche Weise das Kreisbogensegment konstruiert wurde, werden in dem Modell zur Analyse der Schaftprofile hierzu auch keine Annahmen getroffen. Die einzigen Prämissen, die in das Konstruktionsmodell eingehen, sind die Annahme, dass dem empirischen Schaftprofil der Pantheonsäulen ein Kreissegment zu Grunde liegt und dass dieses um den Faktor 16 gestreckt wurde, um das Profil einer Säule im Originalmaßstab zu erhalten. Das als Mathematica-Notebook implementierte Konstruktionsmodell²⁵

Entasis Models of Pantheon Columns

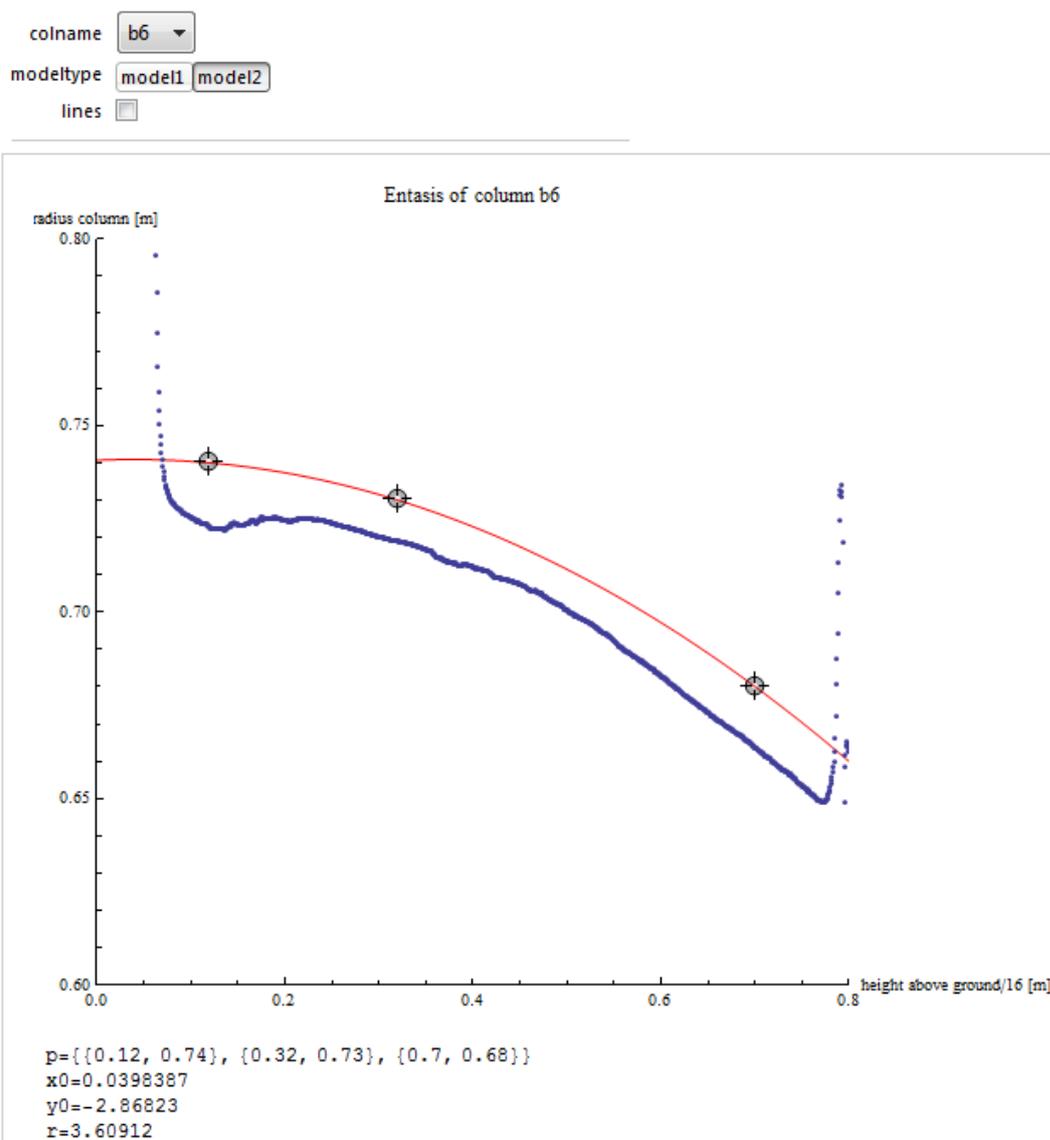


Abb. 7 | BDPP0752: Interaktives Modell zur Kreisapproximation.

ermöglicht es entsprechend, vertikal um den Faktor 16 gestauchte Profile der Säulen anzuzeigen und diesen interaktiv verschiedene Kreisbogensegmente zu überlagern. Hierzu werden mindestens drei relevante Punkte des Profils als Stützpunkte definiert, für die dann auf Basis eines Best-Fit-Algorithmus ein Kreis berechnet wird (vgl. Abb. 7). Die Stützpunkte werden dabei so gewählt, dass sie an charakteristischen Knickstellen liegen.²⁶

26 Die Schaftprofile im Konstruktionsmodell sind gegenüber der Didyma-Zeichnung um 90°gedreht. Die unterschiedlichen Schaftprofile können im Menü oben links ausgewählt werden (*colname*). Mit den Schaltflächen *model1* und *model2* lässt sich zwischen einem Kreis mit vorgegebenem Radius (*model1*) und einem Kreis mit variablem Radius (*model2*) wählen. Mit der Schaltfläche *lines* wird jeweils der untere und obere Schafttradius entsprechend den gemessenen und bei Vitruv überlieferten Werten eingeblendet. Mit dem Schieberegler *yshift* kann das empirische Profil vertikal verschoben werden, um unterschiedliche Schafttradien zu korrigieren. Durch Klicken und Ziehen der Stützpunkte wird das Kreissegment (rot) interaktiv manipuliert. Zusätzliche Stützpunkte lassen sich durch Klicken der linken Maustaste bei gleichzeitig gedrückter ALT-Taste hinzufügen. Das Entfernen von Stützpunkten erfolgt durch Drücken der ALT-Taste und Klicken auf den jeweiligen Stützpunkt.

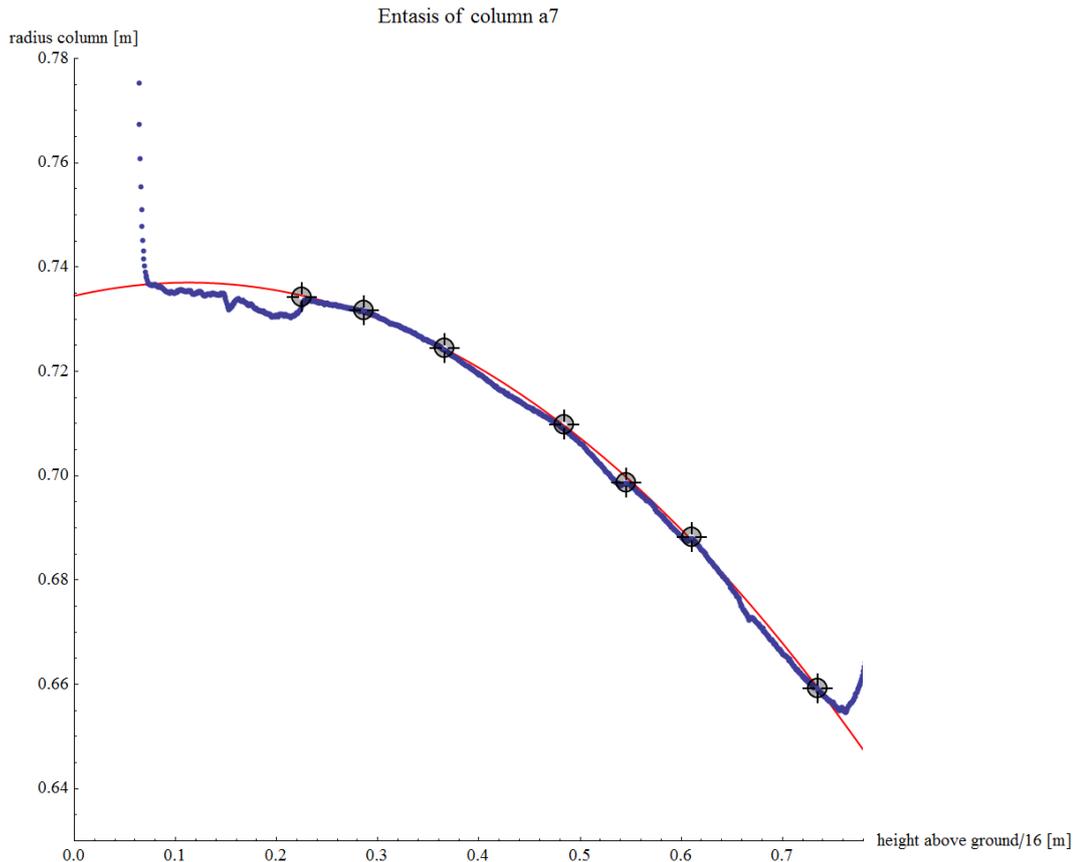


Abb. 8 | BDPP0752: Um den Faktor 16 gestauchtes Profil der Säule A7 mit überlagertem Kreissegment. Das Kreissegment wurde mit einem Best-Fit-Algorithmus für die angegebenen Messpunkte berechnet.

Die Säule A7 beispielsweise hat bis auf Beschädigungen im unteren Teil ein vergleichsweise harmonisch gekrümmtes Profil (vgl. Abb. 8). Bei genauerer Betrachtung aber lassen sich kurze geradlinige Abschnitte identifizieren, die Rückschlüsse auf den Herstellungsprozess ermöglichen. Definiert man die Knickstellen als Stützpunkte und lässt einen Kreis nach der Methode der geringsten Summe der Fehlerquadrate an die Messpunkte berechnen, dann zeigt das so bestimmte Kreisbogensegment nicht nur eine gute Übereinstimmung mit den gewählten Messpunkten, sondern auch mit dem empirischen Schaftprofil. Das Profil der Säule C8 dagegen (vgl. Abb. 9) setzt sich aus drei relativ scharf abknickenden geradlinigen Abschnitten zusammen. Lokalisiert man die Messpunkte an den entsprechenden Knickstellen und berechnet den zugehörigen optimalen Kreis, so zeigt sich, dass sich auch das Profil der Säule C8 schlüssig auf eine Kreisbogenkonstruktion zurückführen lässt. Allerdings sind die einzelnen Profilabschnitte bei der Realisierung dieser Säule deutlich gröber interpoliert als zum Beispiel bei der Säule A7. Deshalb kommt es besonders im stark gekrümmten mittleren Drittel zu deutlich größeren Abweichungen zwischen Konstruktionsprofil und empirischem Profilverlauf.

Der systematische Vergleich der Schaftprofile aller original erhaltenen Säulen mit überlagerten Kreisen zeigt, dass sich alle Profile schlüssig auf eine Kreisbogenkonstruktion zurückführen lassen. Dass sich überhaupt für jedes gestauchte Säulenprofil ein passendes Kreisbogensegment finden lässt, bestätigt bei der Konstruktion der Pantheonsäulen, genau wie in Didyma, zugleich die Verwendung eines Verkürzungsfaktors von 16.

Die Verteilung der auf Grundlage des Konstruktionsmodells bestimmten Kreisbogenmittelpunkte ist in den Abbildungen 10 und 11 dargestellt. Auf der x-Achse ist der Abstand der Kreismittelpunkte von der Schaftachse abgetragen; auf der y-Achse die Distanz von der Basislinie. Die Messergebnisse überraschen. Denn erstaunlicherweise ergibt sich

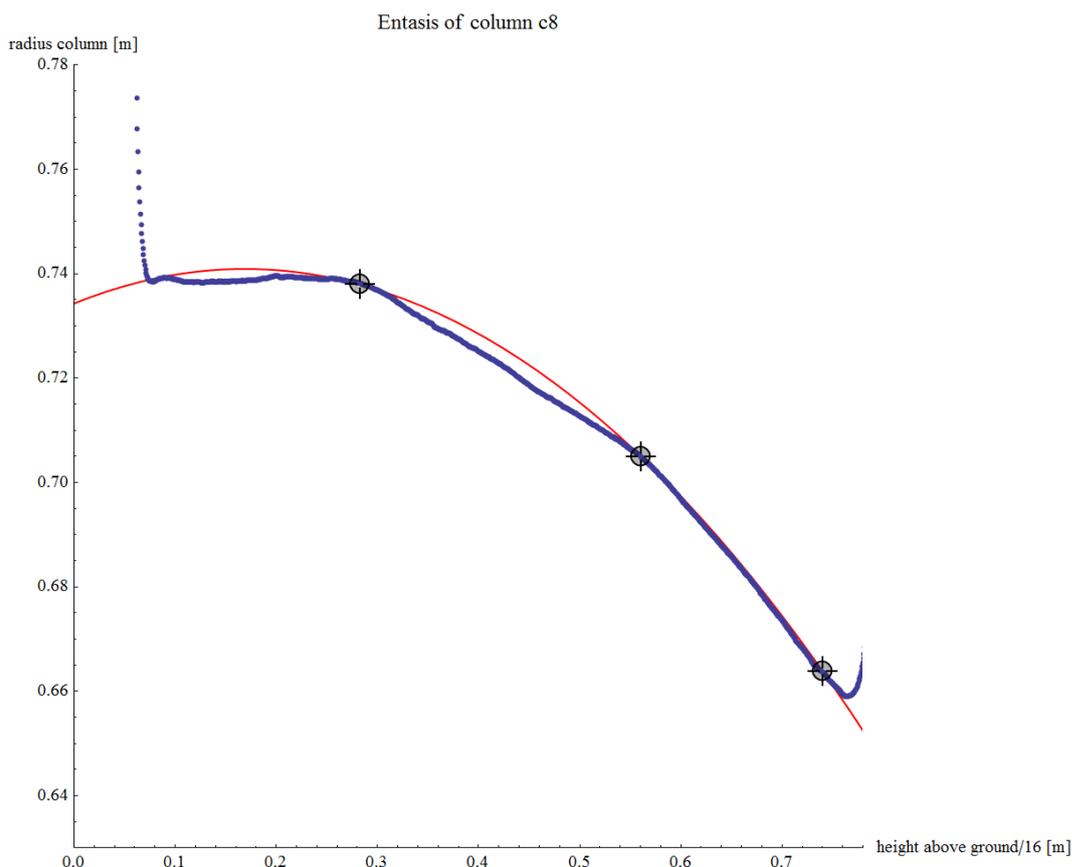


Abb. 9 | BDPP0752: Um den Faktor 16 gestauchtes Profil der Säule C8 mit überlagertem Kreissegment. Das Kreissegment wurde mit einem Best-Fit-Algorithmus für die angegebenen Messpunkte berechnet.

nach Auswertung der Schaftprofile nicht wie ursprünglich erwartet und bislang stillschweigend angenommen²⁷ eine für alle Säulen einheitliche Konstruktion. Vielmehr lassen sich unter den Portikussäulen des Pantheon wenigstens zwei Konstruktionstypen deutlich voneinander unterscheiden.

In der einen Gruppe beträgt der Abstand der Mittelpunkte von der Schaftachse 1,9 m bis 2,1 m (vgl. Abb. 10), das heißt, die entsprechenden Kreisbogensegmente haben einen Radius von 2,6 m bis 2,8 m. Der vertikale Abstand von der Basislinie des Schaftes beträgt 0,05 m bis 0,13 m. Auf Grundlage der Werte für den Abstand von der Grundlinie und für den Radius des Konstruktionkreises darf man mithin schließen, dass es sich bei dieser Gruppe um eine Grundlinienkonstruktion nach Art der Didymazeichnung (vgl. Abb. 5 und 6) handelt. Die Radien der Konstruktionkreise liegen in einer Größenordnung von vier unteren Schaftstrahlen ($4 \cdot 0,73 \text{ m} = 2,92 \text{ m}$). Die Abweichungen der empirischen Werte vom berechneten Wert lassen sich durch unbeabsichtigte Verschiebungen des Mittelpunktes erklären, die angesichts der Dimensionen der Konstruktion und ihres äußerst spitzwinkligen Charakters durchaus nicht unwahrscheinlich sind.

Die Mittelpunkte der zweiten Gruppe hingegen haben einen Abstand von 1,2 m bis 1,45 m von der Schaftachse. Ihr vertikaler Abstand von der Basislinie beträgt zwischen 0,16 m bis 0,22 m (vgl. Abb. 10). Sowohl die Werte für die Radien der Konstruktionkreise (1,9 m bis 2,2 m) als auch der Abstand der Mittelpunkte von der Basislinie machen es unwahrscheinlich, dass es sich bei dieser Gruppe gleichfalls um eine Grundlinienkonstruktion handelt. Sie scheinen vielmehr das Produkt einer bewusst alternativen Entwurfsentscheidung zu sein.

²⁷ Stevens 1924; Wilson Jones 1999.

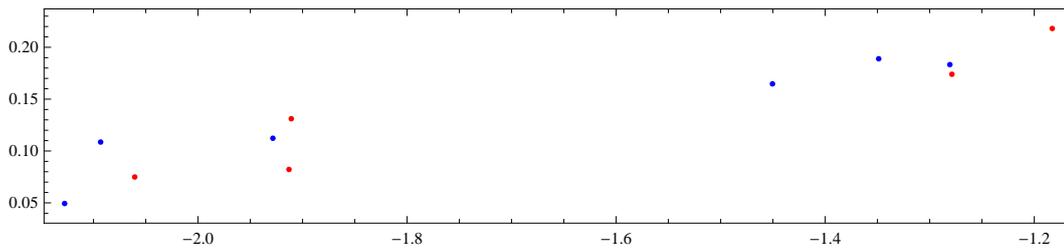


Abb. 10 | Verteilung der Kreismittelpunkte mit den Koordinaten (y_0, x_0) . Blau: Säulen der vorderen Reihe (A). Rot: Säulen der Reihen B und C. Die Säulen A1, B1, C1 wurden als nachantike Reparaturen (vgl. S. 51) nicht berücksichtigt.

Auffälligstes äußeres Merkmal dieser Gruppe (A4, A5, B3, C6 und C8) ist ein nahezu geradliniger vertikaler Profilverlauf im unteren Abschnitt, der erst deutlich oberhalb der Basislinie in ein Kreisbogensegment übergeht. Bemerkenswert ist dabei, dass dieses Kreisbogensegment nicht tangential an den unteren vertikalen Abschnitt anschließt, sondern auch bei diesem Konstruktionstypus sowohl durch den unteren als auch durch den oberen Endpunkt des Profils verläuft. Der unten über den vertikalen Abschnitt herausragende Teil des Kreisbogens wird gewissermaßen ‚abgetrennt‘ und durch einen geradlinigen vertikalen Abschnitt ersetzt (vgl. Abb. 12). Der Mittelpunkt des Kreisbogensegments liegt bei diesem Konstruktionstypus auf der halben Höhe des geradlinigen unteren Profilabschnitts.

In Abbildung 13 ist die Verteilung der Mittelpunkte mit einem einheitlichen Maßstab für die x- und y-Achse dargestellt. Außerdem ist rechts die Verbindungslinie zwischen unterem und oberem Endpunkt des Konstruktionsprofils eingezeichnet sowie die auf ihr errichtete Mittelsenkrechte. Deutlich lässt sich erkennen, dass *alle* Konstruktionskreismittelpunkte mit nur geringen Abweichungen auf dieser Mittelsenkrechten liegen. Die Darstellung zeigt damit nochmals sehr anschaulich, dass alle Schäfte auf Basis von Kreissegmenten profiliert sind, die durch den unteren und oberen Profilen­d­punkt verlaufen, auch diejenigen, die unten mit einem geradlinigen vertikalen Abschnitt beginnen.

Die systematische Analyse der Schaftprofile führt noch in einer zweiten Hinsicht zu unerwarteten Ergebnissen. Die grauen Granitmonolithe der ersten Säulenreihe stammen, mit Ausnahme der im 17. Jahrhundert restaurierten östlichen Ecksäule,²⁸ aus den kaiserlichen Steinbrüchen am Mons Claudianus in Ägypten.²⁹ Die rötlichen Säulenschäfte der dahinter liegenden Säulen stammen mutmaßlich aus der Gegend von Assuan.³⁰ In antiken Steinbrüchen erhaltene Überreste monolithischer Säulenschäfte deuten darauf hin, dass diese schon im Steinbruch sehr weitgehend profiliert wurden.³¹ Es läge daher nahe, dass sich die beiden unterschiedlichen Profiltypen eindeutig den beiden unterschiedlichen Herkunftsorten zuordnen lassen. Die Auswertung des Gesamtbestandes der Portikussäulen zeigt indes, dass beide Konstruktionstypen bei Schäften beiderlei Provenienz vorkommen. Dies führt zu dem Schluss, dass die endgültige Profilierung nicht schon im Steinbruch erfolgte, sondern erst am Bestimmungsort, wobei mindestens zwei unterschiedliche Konstruktionsvarianten benutzt wurden.

In methodischer Hinsicht lohnt es, noch einmal zu betonen, worin sich die hier vorgestellte Erklärung von bisherigen Ansätzen unterscheidet. Anders als in der erwähnten Analyse der römischen Entasis von Gorham P. Stevens³² geht es in dem hier entwickelten

28 Fine Licht 1968, 242.

29 Scaife 1953.

30 Fine Licht 1968, 40.

31 Wilson Jones 1999, 246.

32 Stevens 1924.

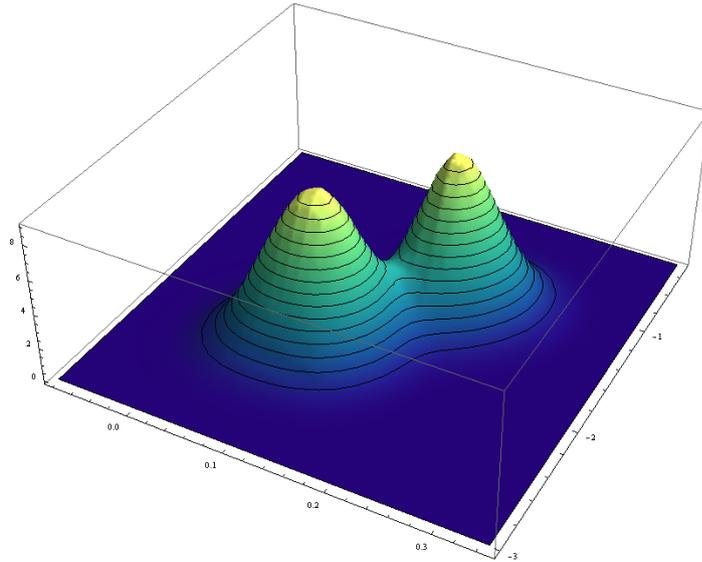


Abb. 11 | Wahrscheinlichkeitsverteilung der Kreismittelpunkte.

Ansatz *nicht* darum, besonders gut zum empirischen Profilverlauf passende Kurven zu finden. Vielmehr geht es darum, kausal zu erklären, auf welche Weise die Schaftprofile des Pantheon zustande gekommen sind. Eine solche Erklärung muss einerseits ein (geometrisches) Konstruktionsverfahren angeben, das klar definierte Parameter enthält, die für den empirischen Profilverlauf kausal relevant sind. Darüber hinaus muss das Verfahren historisch angemessen sein und sich mit möglichst einfachen Mitteln auf einer antiken Baustelle ausführen lassen. Andererseits muss die Erklärung Aussagen dazu machen, wie konkrete Säulenschäfte auf Basis der Konstruktion hergestellt wurden.

Mit einer Kreissegmentkonstruktion nach Art der Didyma-Zeichnung ist ein Verfahren angegeben, das sich mit einfachsten Mitteln ausführen lässt. Ihre Hauptkonstruktionsparameter sind der untere Schaftradius, das wohldefinierte ganzzahlige Verhältnis zwischen Säulendurchmesser und Säulenlänge sowie die für Säulen einer bestimmten Größe charakteristische Differenz zwischen unterem und oberem Schaftradius – alles

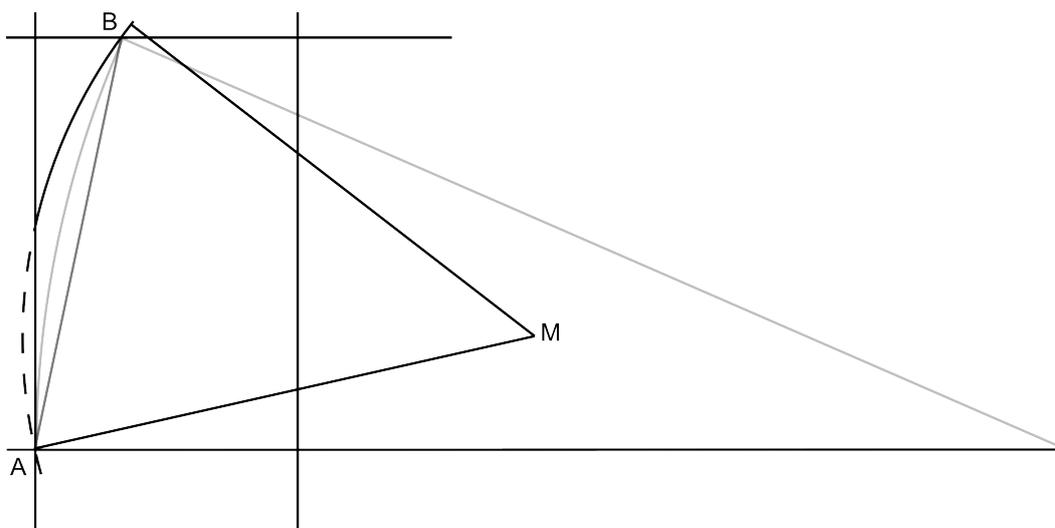


Abb. 12 | Schematische Darstellung des zweiten Konstruktionstypus. Der Konstruktionskreis verläuft wie bei der Grundlinienvariante (grau) durch den unteren und oberen Profildpunkt (A, B). Der Radius des Kreisbogensegments ist jedoch kleiner und der Mittelpunkt (M) gegenüber der Grundlinie nach oben verschoben. Im unteren Teil wird der über den vertikalen Abschnitt herausragende Teil ‚abgetrennt‘.

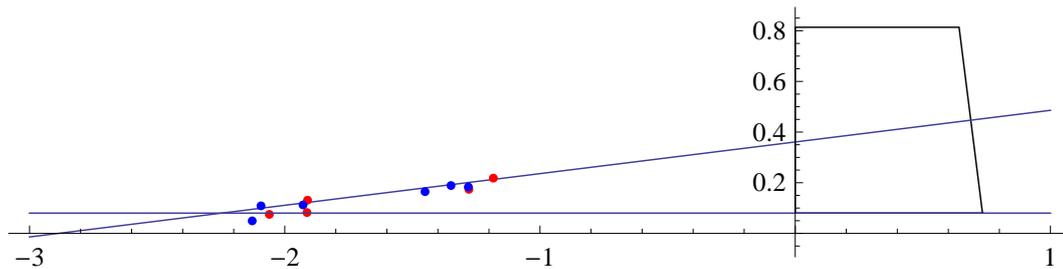


Abb. 13 | Verteilung der Kreismittelpunkte mit einheitlichem Maßstab für x- und y-Achse und Mittelsenkrechten auf die Verbindungslinie zwischen unterem und oberem Endpunkt des Schaftprofils.

Parameter, deren konkrete Werte und deren Relevanz für den Entwurf durch Vitruv bezeugt werden. Ein Modell des Herstellungsprozesses, das in der Lage ist, auch Abweichungen des empirischen Profilverlaufs vom Konstruktionsprofil zu erklären, wird im folgenden Abschnitt vorgestellt. Grundsätzlich lässt sich allerdings schon an dieser Stelle sagen, dass sich die Güte der Erklärung nicht nach dem Grad der Übereinstimmung einer geometrischen Kurve mit dem Profilverlauf bemisst, sondern danach, inwieweit sich Gründe für die jeweilige Abweichung angeben lassen.

6 Praktische Realisierung des Säulenschaftes

6.1 Herstellungsphasen

Die entscheidenden Phasen der Herstellung monolithischer Säulenschaftes lassen sich anhand unvollendet gebliebener Exemplare zumindest in Umrissen rekonstruieren. Nachdem der Schaftrohling im Steinbruch als Quader aus der Wand gebrochen worden war, wurde er offenbar zunächst in Zylinderform gebracht. Im folgenden Schritt wurde dann das Entasisprofil entsprechend der Konstruktion in genau kontrollierten Abständen am Werkstück abgetragen und in Form konzentrischer Ringe eingeschlitzt. In einem abschließenden Arbeitsgang wurde dann das zwischen den Profilringen überstehende Material gleichmäßig abgearbeitet (vgl. Abb. 14) und die Schaftoberfläche geglättet.

Monolithische Schäfte wurden offenbar durchaus schon in den Steinbrüchen grob profiliert und bis auf einen halben Fuß genau abgelängt, schließlich lassen sich mit der Verjüngung des Säulenschaftes gegenüber der Zylinderform mehr als 10% an Gewicht einsparen. Bei einer Masse von rund 50 bis 55 Tonnen pro Schaft stellt dies für Säulen in der Größe der Portikussäulen eine sicherlich nicht unerhebliche Erleichterung beim Transport dar. Eine allzu feine Bearbeitung des Rohlings im Steinbruch indes war angesichts der Transportrisiken nicht zweckmäßig. Es steht deshalb zu vermuten, dass die endgültige Profilierung erst am Bestimmungsort vorgenommen wurde.³³ Der Nachweis zweier unterschiedlicher Konstruktionsvarianten für das Schaftprofil an den Portikussäulen des Pantheon, die sich nicht mit der Provenienz der Schäfte zur Deckung bringen lassen, bestätigt diese Annahme.

6.2 Charakteristische Fehler

Im Zuge der unterschiedlichen Herstellungsphasen können verschiedene Fehler auftreten, die Rückschlüsse auf den Entwurfs- und Fertigungsprozess ermöglichen. Fehler können beim Anfertigen der Konstruktionszeichnung auftreten oder beim Übertragen der

33 Wilson Jones 1999, 247.



Abb. 14 | Unvollendeter monolithischer Säulenschaft aus Ain Dougga (Tunesien). Im vorderen Teil sind gut die in regelmäßigen Abständen angebrachten Ringe zu erkennen, mit denen der Schaft profiliert wurde. Wilson Jones 1999, 243 Abb. 13.17.

relevanten Größen von der Zeichnung auf das Werkstück oder bei der handwerklichen Umsetzung der Profilvorgaben am Schaftrohling. Die unterschiedlichen Fehler sind unter günstigen Bedingungen charakteristisch für ihre jeweilige Ursache.

Die vielleicht auffälligsten Fehler bei den Portikussäulen sind die zwischen den einzelnen Exemplaren deutlich variierenden Schaftdicken. Alle original erhaltenen Säulen haben ein gleichartiges Schaftprofil. Das heißt, den unteren und oberen Endpunkt des Profils verbindet ein schwach gekrümmter Bogen und die Differenz zwischen unterem und oberem Schaftradius ist konstant. Die Dicke der Schäfte hingegen variiert zwischen den einzelnen Säulen um bis zu 0,06 m.³⁴ Eine vergleichbare Schwankung des Schaftradius lässt sich am Profil einzelner Säulen nicht erkennen. Das Fehlerbild der Schaftprofile (vgl. Abb. 4) belegt damit also einerseits, dass der Profilverlauf von der absoluten Schaftdicke unabhängig ist. Andererseits zeigt der Vergleich der Profile, dass die konkrete Form eines Schaftes offenbar nur von der Lage eines einzigen Punktes abhängt. Wird dieser falsch gewählt, hat dies zur Konsequenz, dass alle von ihm abhängigen Werte ebenfalls falsch sind, weil sie differenziell auf den Referenzpunkt bezogen sind. Ein solcher Fehler könnte beispielsweise dann auftreten, wenn die Stützpunkte des Schaftprofils mit Hilfe einer Schablone oder straff gespannten Schnur bestimmt wurden, die zu eng oder zu weit vom Schaftrohling befestigt war. In diesem Fall lägen alle Stützpunkte zu eng an der Schaftachse oder zu weit von ihr entfernt und der resultierende Schaft wäre entsprechend zu schmal oder zu dick.

Als zweiter Fehlertypus lässt sich die Interpolation des Profils durch einen Polygonzug identifizieren. Beim Übertragen der Konstruktionszeichnung auf den Säulenschaft wird der Kreisbogen zu einem Ellipsensegment gedehnt, indem der durch den

³⁴ Vgl. BDPP0748 sowie Tab. 1.

Kreisbogen definierte Schaftadius am Werkstück jeweils auf 16facher Höhe abgetragen wird. Je nachdem, durch wie viele Stützpunkte das Profil definiert wurde, fällt es kantiger oder glatter aus. Die ursprüngliche Lage der Profilringe lässt sich als charakteristischer Knick im Profilverlauf erkennen. Je mehr Stützpunkte das Schaftprofil definierten, desto glatter ist der resultierende Profilverlauf. Die Entasis der Säule B8 beispielsweise ist außerordentlich sorgfältig ausgearbeitet und stimmt nahezu exakt mit dem rekonstruierten Konstruktionsprofil überein. Je weniger Stützpunkte für die Profilierung des Schaftes benutzt wurden, desto ausgeprägter sind die Knicke zwischen den einzelnen geradlinigen Abschnitten. Das Profil der Säule C8 zum Beispiel wird offenbar nur durch zwei Stützpunkte zwischen unterem und oberem Profilendpunkt bestimmt. Entsprechend deutlich treten die beiden Knickstellen hervor und entsprechend groß ist der Abstand zwischen Konstruktionsprofil und empirischem Profilverlauf.

Ein dritter Typus von Fehlern schließlich resultiert aus ungenau definierten Stützpunkten. Sie zeigen sich als kaum merkliche Schwankungen im Profilverlauf. Bei der ansonsten äußerst sorgfältig profilierten Säule B8 zum Beispiel ist der Schaft im mittleren Bereich etwas schmaler als im Konstruktionsprofil vorgesehen. Das ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass der oder die relevanten Stützpunkte etwas zu tief gesetzt wurden. Ähnliche Schwankungen im Millimeterbereich begegnen auch bei den übrigen Säulen. Solche Ungenauigkeiten können entweder von der falschen Übertragung der Konstruktion auf den Schaftrohling herrühren oder von Fehlern bei der handwerklichen Ausarbeitung der Profilringe. Es handelt sich hierbei allerdings um Ungenauigkeiten in einer Größenordnung, die mit dem bloßen Auge kaum wahrzunehmen sind und sich nur anhand der detaillierten Vermessungsdaten beobachten lassen.

7 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Analyse der Portikussäulen des Pantheon lassen sich folgendermaßen zusammenfassen: Die Schäfte der Säulen der Portikus sind im Verhältnis 1 : 8 proportioniert. Aus der durchschnittlichen Länge von 11,7 m und dem mittleren unteren Schaftadius von $0,733 \text{ m} \pm 0,007 \text{ m}$ lässt sich ein Fußmaß von $0,293 \text{ m} \pm 0,003 \text{ m}$ für das Pantheon ableiten. Die Schäfte verjüngen sich von unten nach oben um konstant 0,09 m, was bezogen auf den mittleren unteren Schaftadius einem Verjüngungsfaktor von 0,876 entspricht.

Die ganzzahligen Proportionsverhältnisse an den Schäften bestätigen klar die Anwendung des bei Vitruv überlieferten *Symmetria*-Konzepts. Die konstante Verjüngung der Schäfte bestätigt die von ihm benannte konstruktive Relevanz des unteren und oberen Schaftadius. Mit einem Wert von 0,876 entspricht der Verjüngungsfaktor nahezu exakt dem von Vitruv für Säulen der entsprechenden Größenklasse genannten Wert von $\frac{7}{8}$ (0,875). Die Verstärkung der Ecksäule A8 liegt mit rund 3 % etwas über dem von Vitruv angegebenen Wert, aber durchaus immer noch in der entsprechenden Größenordnung. Insgesamt also werden die von Vitruv überlieferten Grundprinzipien zur Gestaltung von Säulenarchitekturen durch die Vermessung der Pantheonsäulen bestätigt.

Als Konstruktionsprinzip für die Entasis der Portikussäulen des Pantheon lässt sich eine Kreisbogenkonstruktion nach Art der Didymakonstruktion nachweisen. Wie in der Entwurfszeichnung von Didyma sind auch die Portikussäulen mit einem Schaftadius im Originalmaßstab und einem um den Faktor 16 verkürzten Schaftprofil entworfen worden. Das Entasisprofil wird durch ein Kreisbogensegment definiert, das bei der Ausführung eines konkreten Schaftes im Verhältnis 1 : 16 zu einem Ellipsensegment gedehnt wird.

Überraschenderweise lassen sich an den Portikussäulen zwei Varianten dieser Konstruktion unterscheiden. Bei der einen Variante liegt der Mittelpunkt des Kreisbogensegments wie in Didyma in etwa auf der Grundlinie des Schaftes. Der Radius des Bogenseg-

ments beträgt in diesem Fall rund vier untere Schaftstrahlen und das Profil ist von unten bis oben harmonisch gekrümmt. Bei der zweiten Variante beginnt das Schaftprofil mit einem auffälligen vertikalen Abschnitt und geht erst deutlich oberhalb der Grundlinie in ein Kreisbogensegment über. Der Radius des Kreisbogens ist deutlich kleiner und der Mittelpunkt vertikal verschoben. Aber auch bei dieser Variante der Konstruktion verläuft der Kreisbogen durch den unteren und oberen Profildpunkt.

Die systematische Auswertung eines größeren, in sich geschlossenen Bestandes gleichartiger Säulen zeigt außerdem, dass sich die Profile gleichartiger Säulen deutlicher voneinander unterscheiden können als bislang angenommen. Charakteristische Differenzen zwischen den einzelnen Säulen erlauben detaillierte Rückschlüsse auf den Entwurfs- und Fertigungsprozess. Aus dem Nachweis zweier charakteristischer Varianten des Konstruktionsverfahrens beispielsweise lässt sich schließen, dass die endgültige Profilierung der Schäfte offenbar erst in Rom erfolgte, wobei mindestens zwei Werkstätten mit unterschiedlichen Entwurfstechniken an der Ausführung der Säulen beteiligt waren.

Schließlich sei noch betont, dass die vorgestellten Ergebnisse praktisch nur mit Hilfe digitaler Instrumente erzielt werden konnten. Die Resultate lassen sich angemessen nur anhand der detaillierten Messdaten und der sie interpretierenden Modelle rechtfertigen und nachvollziehen. Die über das Online-Angebot des Projekts bereitgestellten Datensätze, Plots und interaktiven Modelle sind deshalb mehr als nur didaktische Hilfsmittel, sondern sie sind integraler und konstitutiver Bestandteil der hier vorgestellten Forschungsergebnisse.

Literaturverzeichnis

Albers u. a. 2009

Jon Albers u. a. „Introduction“. In *The Bern Digital Pantheon Project. Plates*. Hrsg. von Gerd Graßhoff u. a. Berlin u. a.: Lit Verlag, 2009, 7–12.

Becchi 2008

Antonio Becchi. „Imaginer l’entasis. Constructions, définitions, malentendus dans les traités de la Renaissance“. In *La colonne. Nouvelle histoire de la construction*. Hrsg. von R. Gargiani. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, 2008, 148–163.

Fensterbusch 1981

Curt Fensterbusch, Übers. und Erläut. *Vitruv. Zehn Bücher über Architektur*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1981.

Fine Licht 1968

K. de Fine Licht. *The Rotunda in Rome. A Study on Hadrian’s Pantheon*. Kopenhagen: Jutland Archeological Society, 1968.

Graßhoff, Heinzelmann und Wäfler 2009

Gerd Graßhoff, Michael Heinzelmann und Markus Wäfler, Hrsg. *The Pantheon in Rome. Contributions to the Conference Bern, November 9–12, 2006*. Bd. 1. Bern: Bern Studies, 2009.

Gros 1990

Pierre Gros, Hrsg. und Übers. *Vitruve. De l’architecture. Livre III*. Bd. 3. Collection des Universités de France. Paris: Les Belles Lettres, 1990.

Gros 1992

Pierre Gros, Hrsg. und Übers. *Vitruve. De l’architecture. Livre IV*. Bd. 4. Collection des Universités de France. Paris: Les Belles Lettres, 1992.

Haselberger 1980

Lothar Haselberger. „Werkzeichnungen am Jüngerem Didymeion. Vorbericht“. *Istanbuler Mitteilungen* 30 (1980), 191–215.

Haselberger 1983

Lothar Haselberger. „Bericht über die Arbeit am Jüngerem Apollontempel von Didyma. Zwischenbericht“. *Istanbuler Mitteilungen* 33 (1983), 90–123.

Knell 2008

Heiner Knell. *Vitruvs Architekturtheorie. Eine Einführung*. 3. Aufl. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 2008.

Rowland und Noble Howe 1999

Ingrid D. Rowland und Thomas Noble Howe, Hrsg. *Vitruvius. Ten Books on Architecture*. Übers. von Ingrid D. Rowland. Cambridge und New York: Cambridge University Press, 1999.

Scaife 1953

C.H.O. Scaife. „The Origin of Some Pantheon Columns“. *The Journal of Roman Studies* 43 (1953), 37.

Stevens 1924

Gorham P. Stevens. „Entasis of Roman Columns“. *Memoirs of the American Academy in Rome* 4 (1924), 121–152.

Wilson Jones 1999

Mark Wilson Jones. „The Practicalities of Roman Entasis“. In *Appearance and Essence. Refinements of Classical Architecture - Curvature. Proceedings of the Second Williams Symposium on Classical Architecture Held at the University of Pennsylvania, Philadelphia, April 2-4, 1993*. Hrsg. von Lothar Haselberger und Hansgeorg Bankel. Philadelphia: University of Pennsylvania Museum of Archaeology, 1999. Kap. 13, 225–250.

Wilson Jones 2000

Mark Wilson Jones. *Principles of Roman Architecture*. 2. Aufl. New Haven und London: Yale University Press, 2000.

Wilson Jones 2009

Mark Wilson Jones. „The Pantheon and the Phasing of its Construction“. In *The Pantheon in Rome. Contributions to the Conference Bern, November 9-12, 2006*. Hrsg. von Gerd Graßhoff, Michael Heinzemann und Markus Wäfler. Bd. 1. Bern: Bern Studies, 2009, 69–87.

Digitale Ressourcen

BDPP0748

Gerd Graßhoff. „Interactive Comparison Sheet of the Profiles of the Pantheon’s Portico Columns“. In *Digital Repository of the Bern Digital Pantheon Project*. Hrsg. von G. Graßhoff u. a. Bern (Online publiziert: 09.03.2009).

BDPP0749

Gerd Graßhoff. „Interactive 3D Visualization of the Portico Columns“. In *Digital Repository of the Bern Digital Pantheon Project*. Hrsg. von Gerd Graßhoff u. a. Bern (Online publiziert: 28.05.2009).

BDPP0750

The Bern Digital Pantheon Project. „Groundplan of the Portico with Columnlabels of the Bern Digital Pantheon Project“. In *Digital Repository of the Bern Digital Pantheon Project*. Hrsg. von Gerd Graßhoff, Christian Berndt und Markus Wäfler. Berlin (Online publiziert: 12.10.2009).

BDPP0752

Gerd Graßhoff. „Interactive Model of the Pantheon’s Portico Columns Construction“. In *Digital Repository of the Bern Digital Pantheon Project*. Hrsg. von Gerd Graßhoff, Christian Berndt und Elisabeth Rinner. Berlin (Online publiziert: 04.01.2011).

Gerd Graßhoff

Gerd Graßhoff war bis September 2010 Professor für Wissenschaftstheorie und Wissenschaftsgeschichte an der Universität Bern/Schweiz. Zum Oktober 2010 wurde er auf den Stuhl für Wissenschaftsgeschichte der Antike an der Humboldt-Universität zu Berlin berufen. Zu seinen Forschungsschwerpunkten gehören Wissenschaftsgeschichte (seine Themen umfassen sowohl die Babylonische Astronomie als auch die Neuzeit), Methoden wissenschaftlicher Forschung und philosophische Modelle kausalen Schließens.

Professor of History and Philosophy of Science, formerly at Bern University, now Professor for History of Ancient Science at the Humboldt University Berlin. His research fields cover the history of ancient science from Babylonian astronomy to Modern Times, methods of scientific discovery and philosophical models of causal reasoning.

Gerd Graßhoff
Humboldt-Universität zu Berlin
Institut für Philosophie, Philosophischen Fakultät I
Unter den Linden 6
10099 Berlin, Deutschland
gerd.grasshoff@hu-berlin.de

Christian Berndt

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Wissenschaftsgeschichte der Antike an der Humboldt Universität zu Berlin. Studium der Literaturwissenschaft, Kunstgeschichte und Wissenschaftsgeschichte in Berlin und Bern. Seine aktuellen Forschungsinteressen gelten der Epistemologie der Architektur sowie wissenschaftstheoretischen Fragen digitaler Erkenntnismittel.

Research assistant at the Department of Ancient History of Science at the Humboldt University Berlin. He studied literature, art history and history of science in Berlin and Bern. His current research interests include the epistemology of architecture and epistemological questions of digital knowledge resources.

Christian Berndt
Danziger Straße 13
10435 Berlin, Deutschland
berndt@kulturtechniker.de